

*Renato Eusani*

**Tragwerksdynamik 2**  
**Baupraktische Anwendungen**

*Lecture 1:*

**Personeninduzierte Schwingungen**

# Überblick

- **Einleitung & Problemstellung**
- **Dynamische Einwirkungen**
  - **Gehen**
  - **Tanzen**
  - **Laufen**
  - **Hüpfen**
- **Dynamische Berechnung der Schwingungsantworten**
  - **Berechnung als M-DOF-System**
  - **Berechnung als S-DOF-System**
  - **Dämpfung**
- **Konstruktive Vorgaben und Nachweise :**
  - **Fußgängerbrücken**
  - **Geschossdecken**
- **Minderungs- und Verbesserungsmaßnahmen**

# Einleitung

- Rangkonstruktion Konzerthaus Düsseldorf:  
Verwendung für Gospelkonzerte

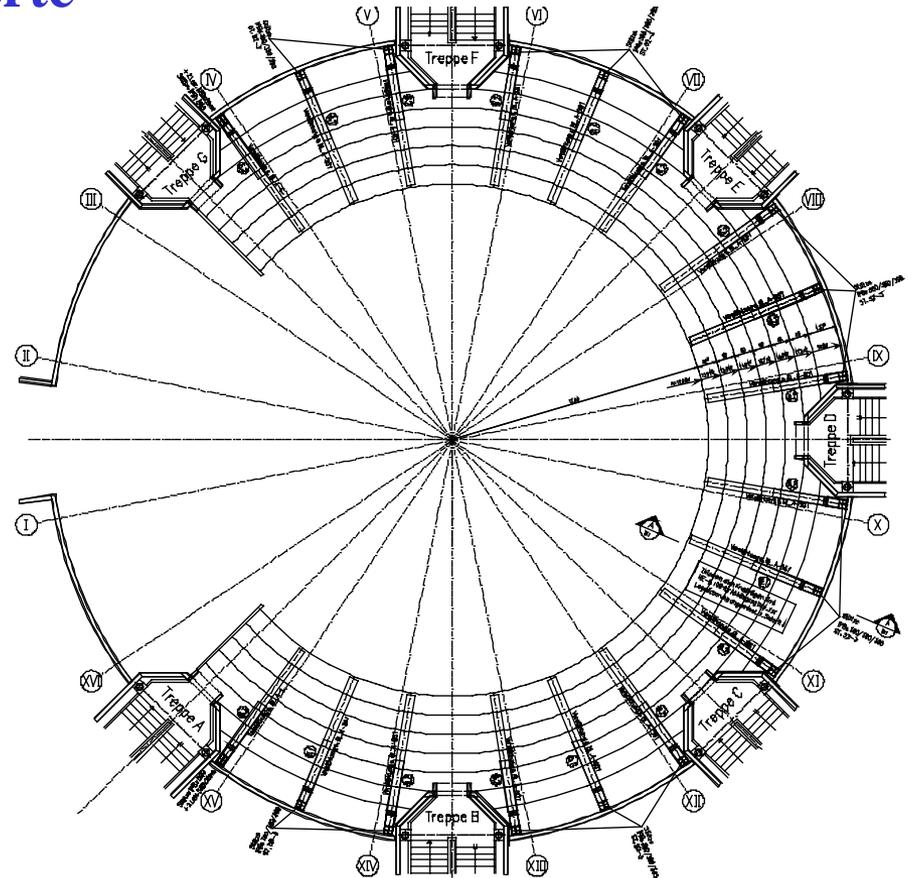
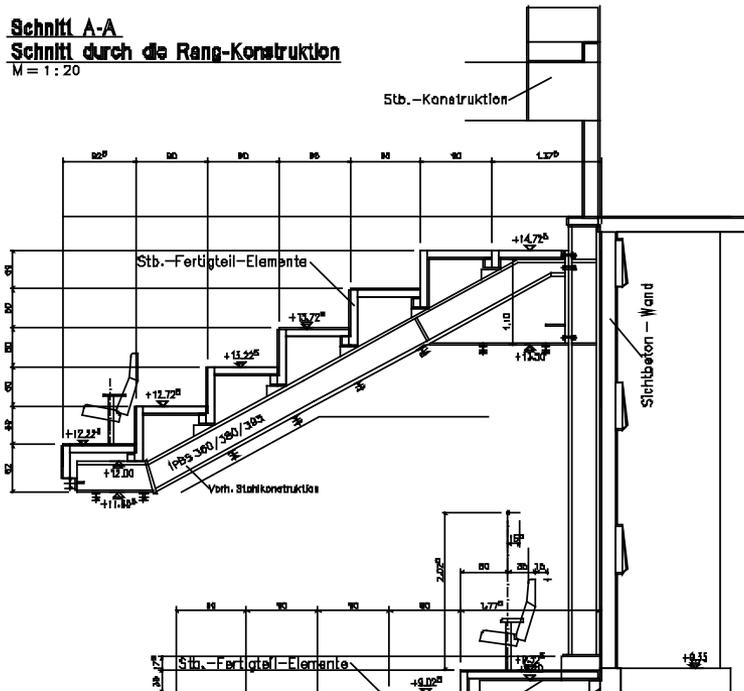
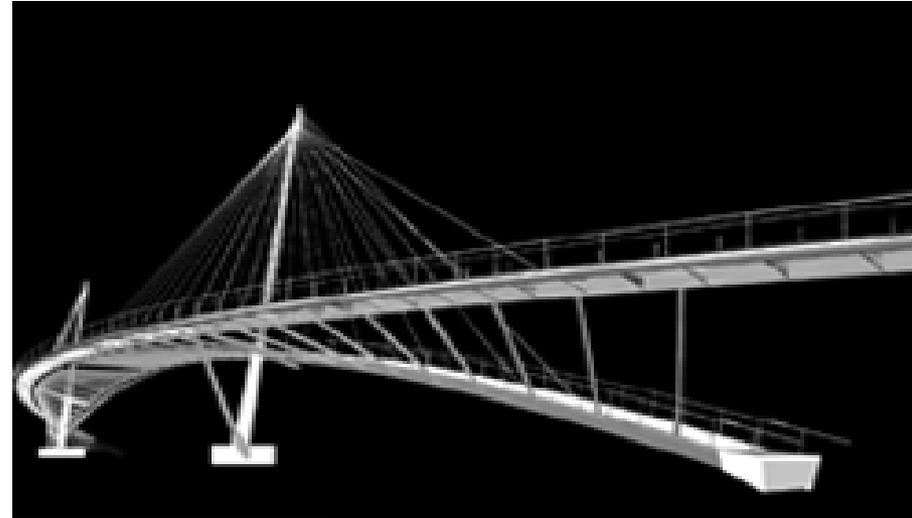


Abb. 2: Grundriss Empore (Ausschnitt aus Plan A1, KKK-Ingenieurgesellschaft, Juni 2004)

# Einleitung

- Fußgängerbrücke Kehl-Strassbourg:



## Großversuch zur Untersuchung der Anregbarkeit



# Einleitung

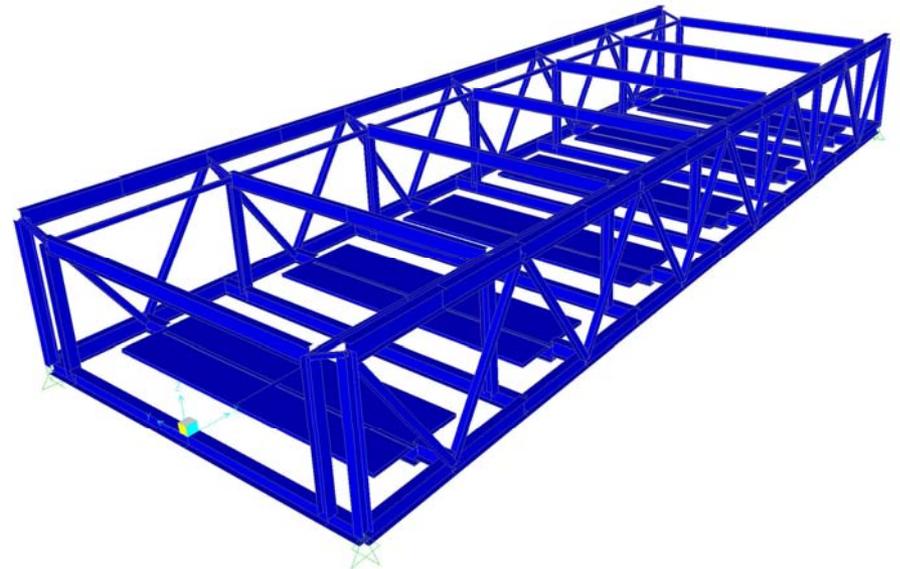
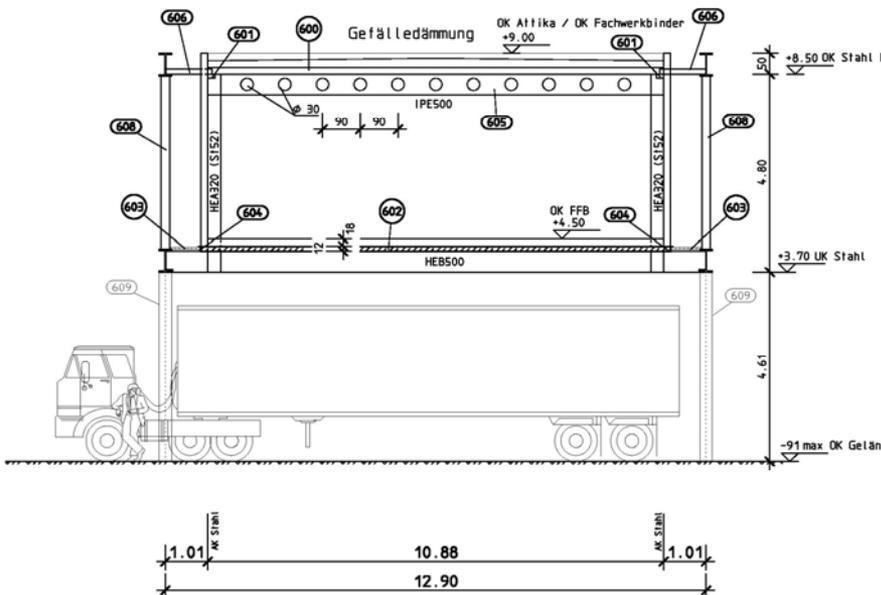
- **Milleniums-Bridge über die Themse:  
Sanierung mit Schwingungsdämpfern gegen  
Horizontalschwingungen**



# Einleitung

- Verbindungsbauwerk, 38 m lang, mit Mensa-Nutzung:  
Verwendung für Feierlichkeiten, Tanzen, ...

Schnitt 8-8 M 1:



# Typische Probleme

- niedrige Eigenfrequenzen
- geringe Massen (Massendämpfungsparameter!)
- geringe Dämpfung
- hochdynamische Lasten (Aerobic-Center, Fußballtribüne)

# Dynamische Einwirkungen

## • Lastverlauf:

- Periodische Last, wird ausgedrückt durch eine harmonische Reihe
- Nicht nur die **Schrittfrequenz**, sondern auch **Vielfache** können ein Bauwerk erheblich anregen.

$$F_P(t) = G \cdot \left\{ 1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sin(2\pi i f_P t - \phi_i) \right\}$$

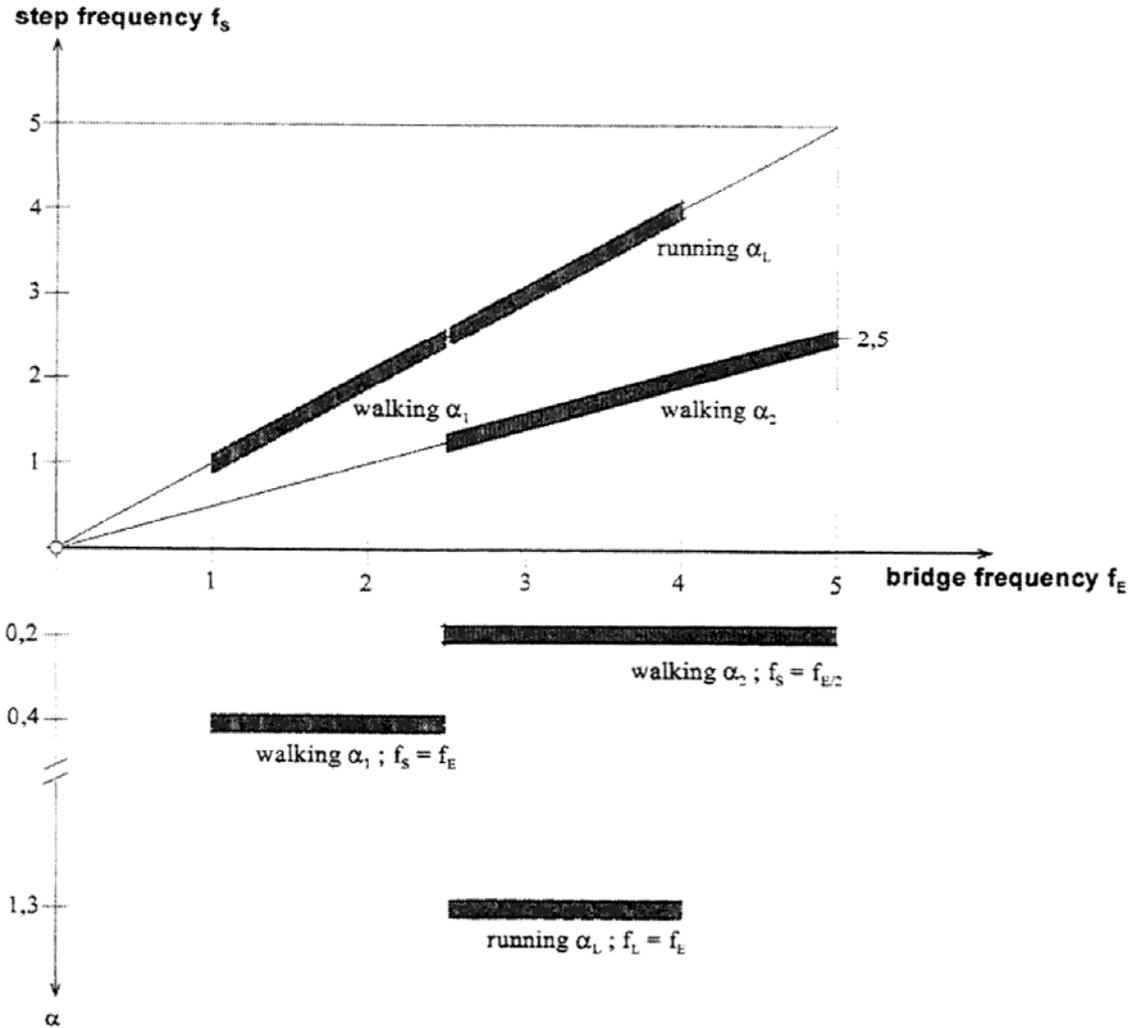
$G$  Eigengewicht einer Person,  $G = 0,8 \text{ kN}$

$\alpha_i$  Fourierkoeffizienten  $i$  – te Harmonische

$\phi_i$  Phasenwinkel  $i$  – te Harmonische

$f_P$  Hüpf – / Lauffrequenz

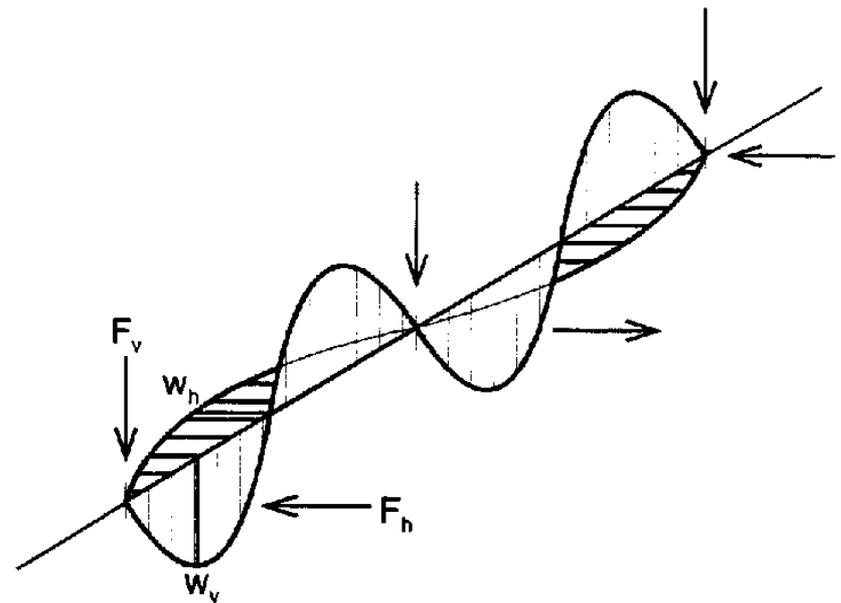
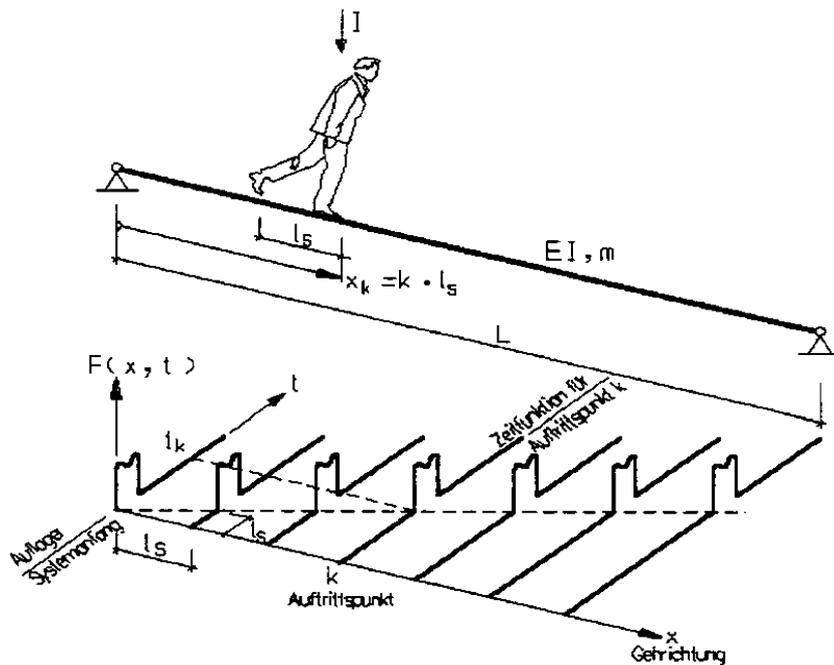
# Dynamische Einwirkungen



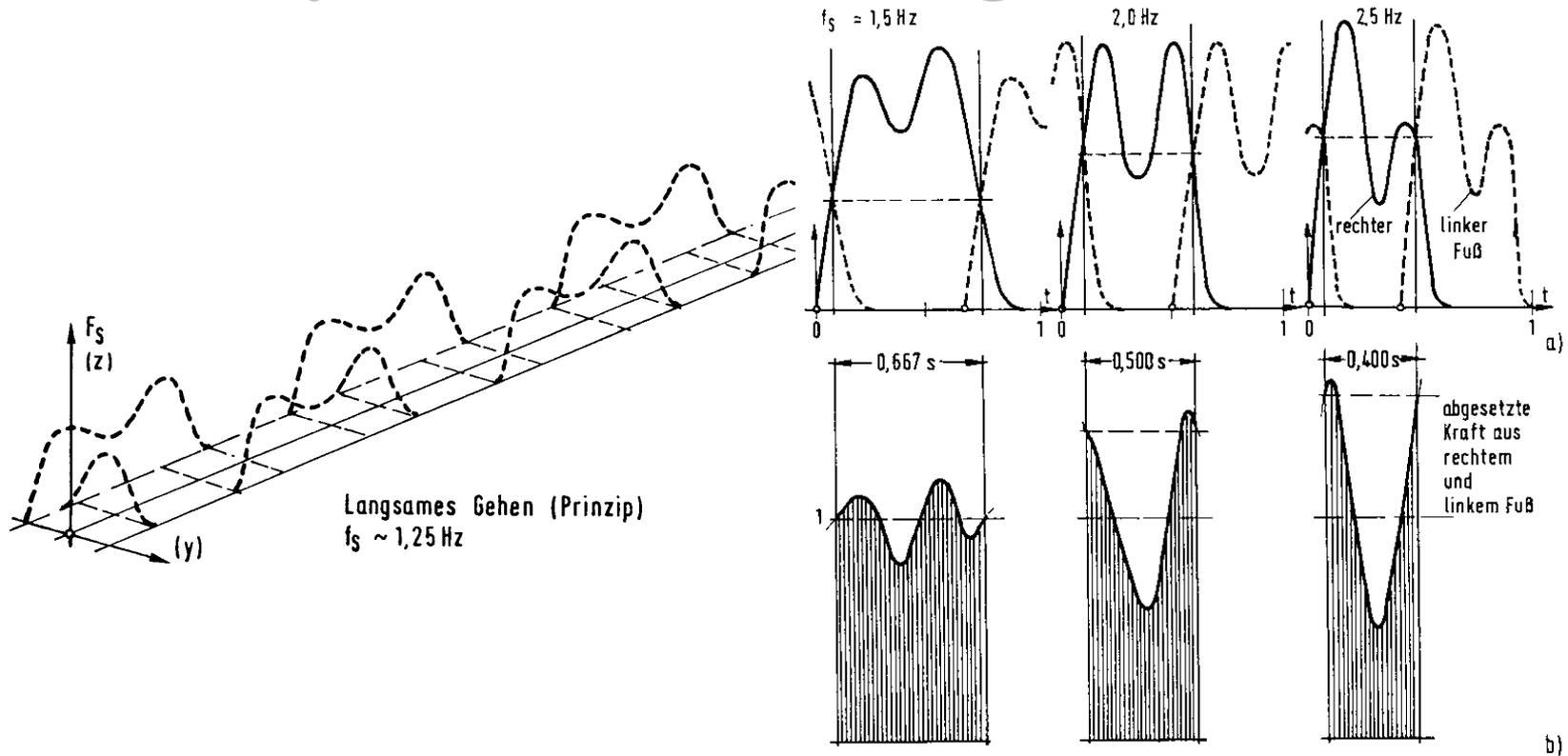
# Dynamische Einwirkungen - Gehen

## • Lastverlauf Gehen:

- es besteht immer Kontakt zwischen Brücke und Passanten
- Schrittfrequenzen sind i. A. normalverteilt, im Mittel ca. 2,0Hz.
- Achtung: quer zur Laufrichtung nur halbe Frequenz!
- Belastungsdichte: ca. 1 Person/m<sup>2</sup>



# Dynamische Einwirkungen - Gehen



Richtung	Frequenz [Hz]	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\phi_1$	$\phi_2$
vertikal z	1,5 - 2,4	0,4 - 0,5	0,15	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
längs x	1,5 - 2,4	0,2	0,1			
quer y	0,75 - 1,20	0,1	0,1			

# Dynamische Einwirkungen - Tanzen

## • Lastverlauf Tanzen:

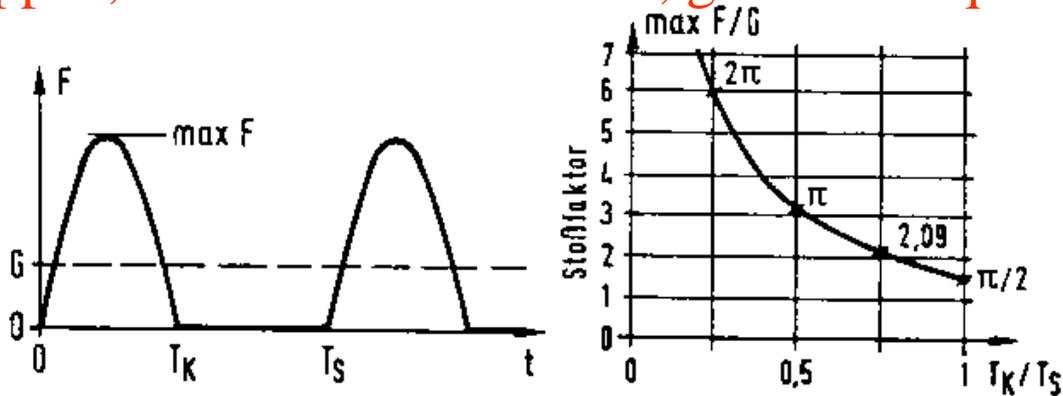
- zumeist besteht Kontakt zwischen Tragwerk und Person
- da der Takt vorgegeben wird, tanzen alle Personen relativ synchron.
- Belastungsdichte: ca. 2-4, in Extremfällen 6 Person/m<sup>2</sup>
- je dichter, desto geringer sind die Beanspruchungen je Person (Bewegungsfreiraum)
- Variation zwischen Gehen und Hüpfen

Richtung	Frequenz [Hz]	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\phi_1$	$\phi_2$
vertikal z	1,5 - 3,0	0,5	0,15	0,1	0 bzw. $\pi/2$	0 bzw. $\pi/2$

# Dynamische Einwirkungen - Laufen

## • Lastverlauf Laufen:

- es besteht nur temporärer Kontakt zwischen Tragwerk und Läufer  
*Halbsinuslast*
- Schrittfrequenzen sind i. A. normalverteilt
- bei Gruppen, die zusammen Laufen, gleiche Frequenz



Richtung	Frequenz [Hz]	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\phi_1$	$\phi_2$
vertikal z	2,4 - 3,5 (ext: 2,2 -5,0)	1,6	0,7	0,2	0	0
längs x	2,4 - 3,5 (ext: 2,2 -5,0)					
quer y	1,0 - 2					

# Dynamische Einwirkungen - Hüpfen

## • Lastverlauf Hüpfen:

- es besteht nur temporärer Kontakt zwischen Tragwerk und Akteur  
*Halbsinuslast*
- Hüpfrequenz 1,8 – 3,4 Hz, bei Gruppen gleich
- Belastung abhängig von der Sprunghöhe

Höhe	Frequenz [Hz]	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\phi_1$	$\phi_2$
normal	2	1,8	1,3	0,7		
normal	3	1,7	1,1	0,5		
hoch	2	1,9	1,6	1,1		
hoch	3	1,8	1,3	0,8		

# Dynamische Berechnung der Schwingungsantworten

## allgemeiner Fall: Berechnung für mehrere Moden

- Modellierung der Lasten als Fourier-Reihe
- Ansatz der maßgebenden Eigenfrequenzen als Lastfrequenzen
- konservativer Ansatz der Dämpfung

### Vorteil:

Antwort infolge aller Lastanteile; dies ist insbesondere dann notwendig, wenn mehrere Eigenfrequenzen in der Nähe der anderen Harmonischen liegen.

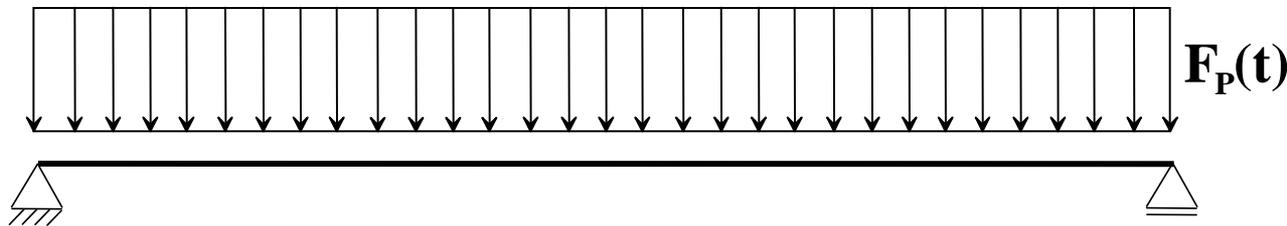
# Dynamische Berechnung der Schwingungsantworten

## Beispiel:

- Einfeldträger,  $f_e = 4.2 \text{ Hz}$
- Ansatz der Eigenfrequenzen als 2. Harmonische der Lastfrequenzen

$$F_P(t) = \frac{n}{l} G \cdot \left\{ 1 + \alpha_1 \cdot \sin(2\pi \cdot 2.1 \cdot t) + \alpha_2 \cdot \sin(2\pi \cdot 4.2 \cdot t - \phi_2) + \alpha_3 \cdot \sin(2\pi \cdot 6.3 \cdot t - \phi_3) \right\},$$

$n$  □ Anzahl der anzusetzenden Personen,  $l$  □ Balkenlänge



# Dynamische Berechnung der Schwingungsantworten

## vereinfacht: Berechnung für nur eine Mode

- Modellierung der Lasten als harmonische Last
- Ansatz der maßgebenden Eigenfrequenzen als Lastfrequenzen
- konservativer Ansatz der Dämpfung

## Vorteile:

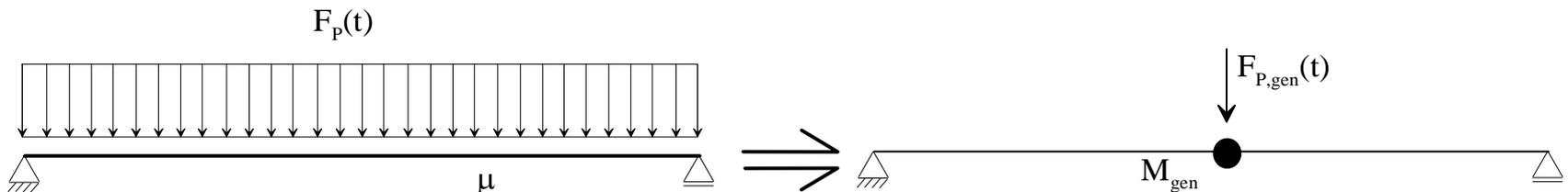
- analytische Lösung *von Hand* möglich
- Wenn die erste Harmonische maßgebend ist, ist der Fehler relativ gering.
- Verfahren ist in den Normen (EC5, Teil2) integriert.

# Dynamische Berechnung der Schwingungsantworten

## Beispiel:

- Einfeldträger,  $f_e = 2.2 \text{ Hz}$
- Ansatz der Eigenfrequenzen als 1. Harmonische der Lastfrequenzen

$$F_p(t) = m \cdot G \cdot \{1 + \alpha_1 \cdot \sin(2\pi \cdot 2.1 \cdot t)\}, \quad m \square \text{ Anzahl der anzusetzenden Personen}$$



# Dynamische Berechnung der Schwingungsantworten

## Dämpfung

- maßgebende Größe für die Strukturantwort
- im Voraus nicht bekannt
- starke Schwankungen, Mittelwerte liegen bedeutend höher als Rechenwerte

Baukonstruktion	Konstruktionsform			
	Stahlbeton	Spannbeton	Stahlverbund	Stahl
Fußgängerbrücken	$\xi > 0.7\%$	$\xi > 0.5\%$	$\xi > 0.5\%$	$\xi > 0.3\%$
Gebäude mit viel Ausbau	$\xi > 1.4\%$	$\xi > 1.0\%$	$\xi > 1.0\%$	$\xi > 0.6\%$

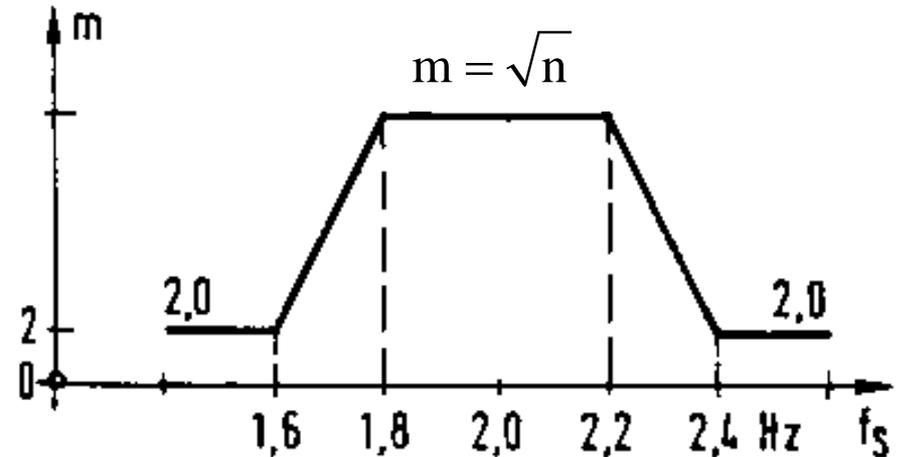
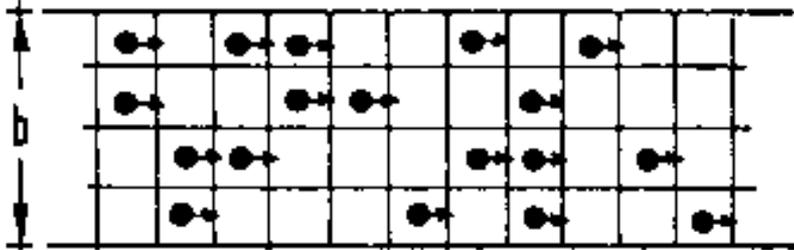
*Empfohlene Rechenwerte der Dämpfung*

# Fußgängerbrücken

- **Tragwerk gilt als unbedenklich, wenn folgende Frequenzbereiche vermieden werden (abgestimmt auf „gehen“):**
  - vertikal: 1,6 bis 2,4 Hz und 3,5 bis 4,5 Hz
  - horizontal: 0,7 bis 3,5 Hz (horizontal reagiert der Mensch empfindlicher!)
- **Bei großen Amplituden können durch Interaktion Brücke / Mensch Synchronisationen auftreten, insbesondere horizontal.**

# Fußgängerbrücken

- Nachweiskonzept:



$$n = q_s \cdot b \cdot l, \quad \text{mit } q_s = [1 \text{ bis } 2 \text{ Pers./m}^2], b = [\text{m}], l = [\text{m}]$$

$$m = \sqrt{n} \quad \text{für } 1,8 \text{ Hz} \leq f \leq 2,2 \text{ Hz}$$

$$m = 2 \quad \text{für } f < 1,6 \text{ Hz oder } f > 2,4 \text{ Hz}$$

$$a = a_{,1} \cdot m \leq \text{zul } \hat{a}$$

$$\text{zul } \hat{a} = 0,5 \cdot \sqrt{f} \quad \text{für } f \leq 5,0 \text{ Hz} \quad (\text{nach BS5400 Part 2})$$

# Geschossdecken

- Tragwerk gilt als unbedenklich, wenn folgende Frequenzbereiche vermieden werden (abgestimmt auf „gehen“):

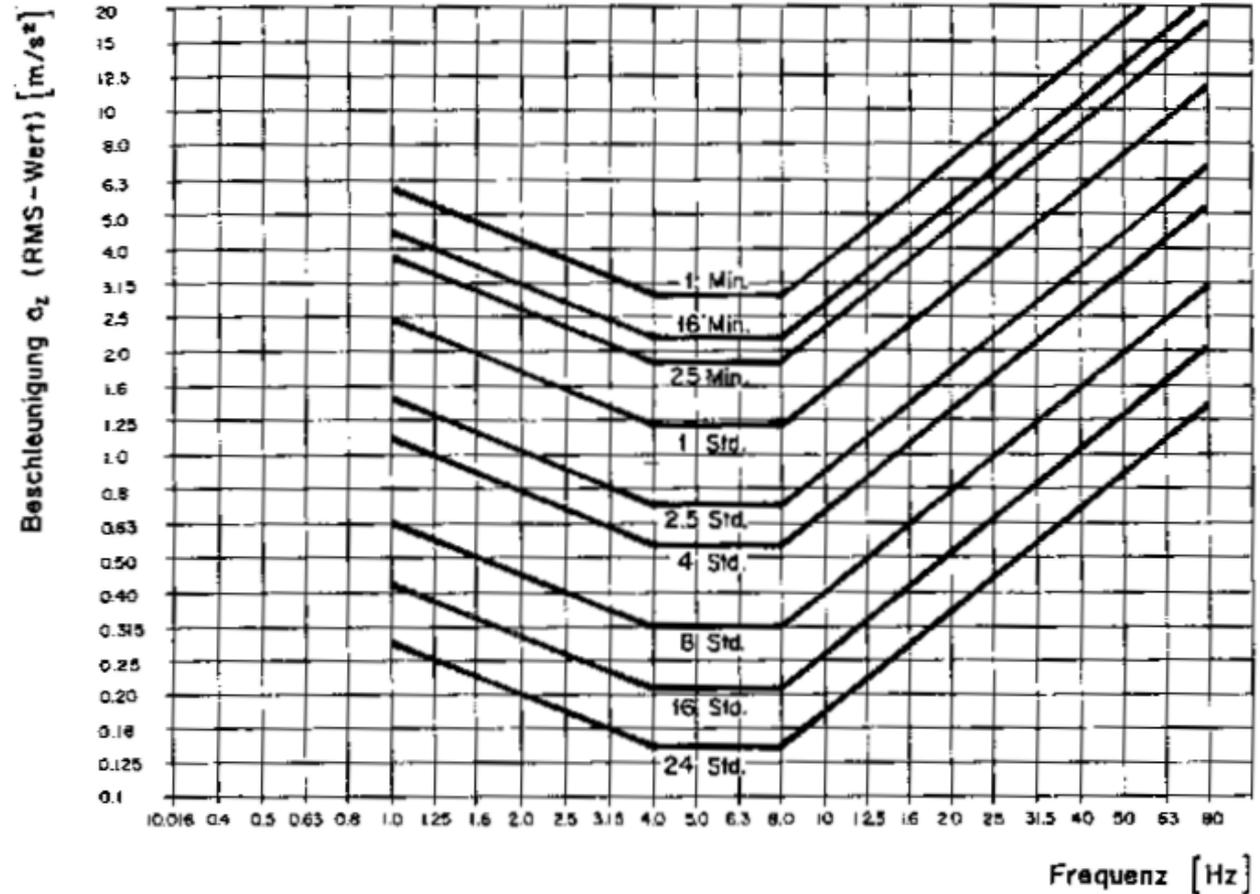
Baukonstruktion	Konstruktionsform			
	Stahlbeton	Spannbeton	Stahlverbund	Stahl
Öffentl. Gebäude, Büros	>4,8 Hz für $\xi > 5\%$		>7,2 Hz für $\xi < 5\%$	
Gymnastik- und Sporthallen	> 7,5 Hz	> 8,0 Hz	> 8,5 Hz	> 9,0 Hz
Tanz- und Konzertsäle ohne feste Bestuhlung (Disco)	> 6,5 Hz	> 7,0 Hz	> 7,5 Hz	> 8,0 Hz
Tanz- und Konzertsäle mit fester Bestuhlung (Theater), Tribunen		vertikal:	> 6,5 Hz	
		horizontal:	> 2,5 Hz	

- **Nachweiskonzept:**  $n = q_s \cdot b \cdot l$ , mit  $q_s = [\text{Pers.}/\text{m}^2]$ ,  $b = [\text{m}]$ ,  $l = [\text{m}]$   
 $a \leq a_{,1} \cdot n \leq \text{zul } \hat{a}$

- zulässige Werte nach DIN 4150, Teil 2 oder nach Literatur.

# Geschossdecken

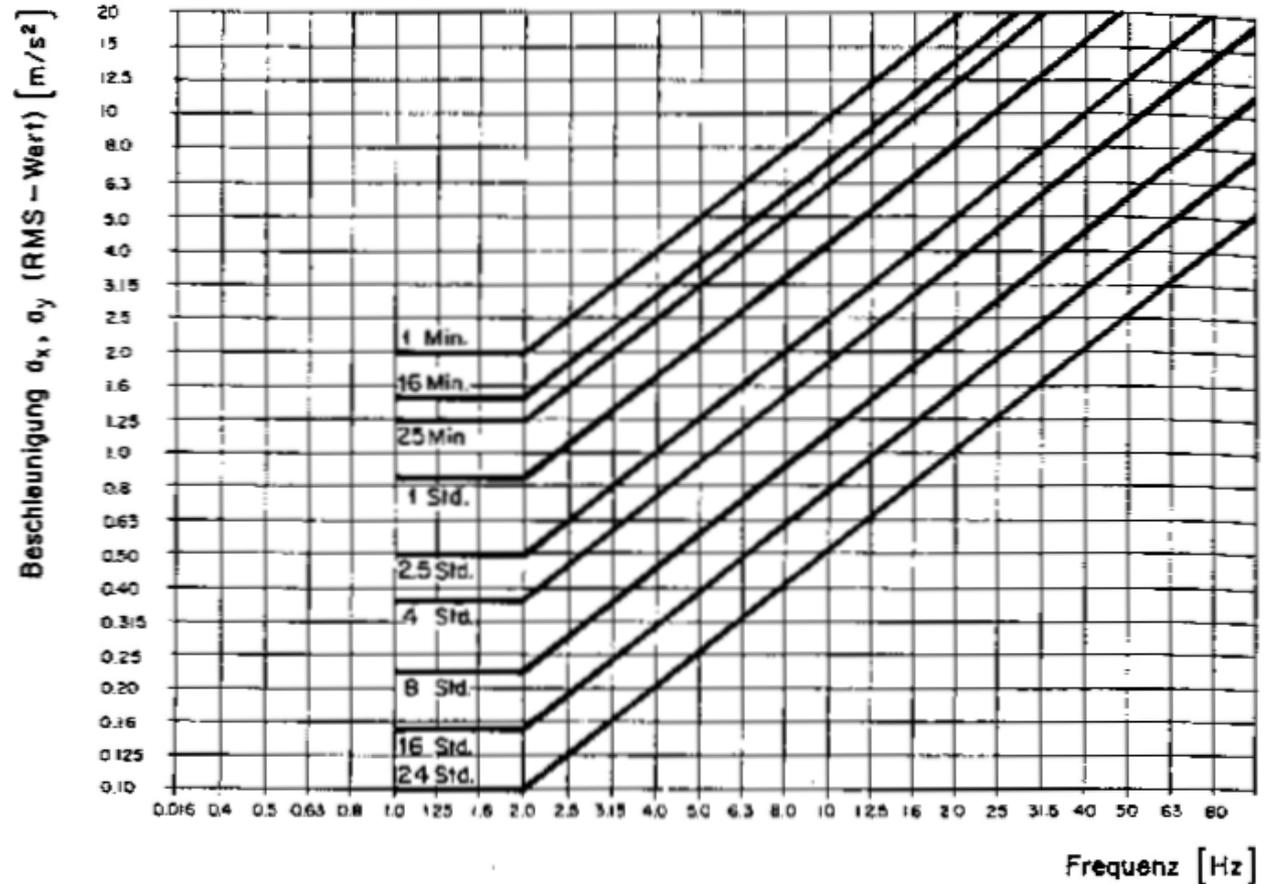
$$a_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$



**Anhaltswerte nach ISO2631(1980) zulässiger Schwingbeschleunigungen in z-Richtung für die Ermüdungsgrenze; Werte für die Gefährdungsgrenze durch Multiplikation mit 2.0; Werte für die Komfortgrenze durch Division mit 3.15**

# Geschossdecken

Z-Richtung zeigt stets in Richtung der Wirbelsäule, x- und y-Richtungen senkrecht dazu.



Anhaltswerte nach ISO2631(1980) zulässiger Schwingbeschleunigungen in x- und y-Richtung für die Ermüdungsgrenze;  
Werte für die Gefährdungsgrenze durch Multiplikation mit 2.0; Werte für die Komfortgrenze durch Division mit 3.15

# Minderungs- und Verbesserungsmaßnahmen

- **Einsatz dynamischer Schwingungsdämpfer (TMD):**
  - sehr starke Dämpfung
  - unabhängig von zur Verfügung stehenden Lager- / Festpunkten
  - wirken frequenz-/modengebunden
- **Erhöhung der Strukturdämpfung**
  - Reibungs- / Viscodämpfer „Stoßdämpfer“
  - Dämpfung reicht oftmals schon aus
  - benötigen Festpunkte oder Loslager mit ausreichend Lagerweg
  - wirken Frequenz-/Moden-unabhängig
- **Anhebung der Eigenfrequenzen**
  - nur in geringem Umfang möglich
  - meist verbunden mit mehr Steifigkeit